doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.02.08

# 基于主成分分析法和监测数据的阿尔泰山采金废弃矿区人工恢复措施效益分析①

艾沙江·艾力， 徐海量， 苑塏烨
（中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

**摘 要：** 本文以阿尔泰山两河源保护区采金废弃矿区为研究区，从地形、土壤、水分和地表植被4个方面出发，结合矿区现有条件，设置11种恢复措施，选取丰富度指数、优势度指数、多样性指数、均匀度指数、生物量、植被盖度、物种数及土石比等7个评价指标，采用主成分分析法，得出不同恢复措施的主成分得分及生态效益排名。结果表明，单一恢复措施，如推平、羊群驻扎、泥浆等基本上是从某一个方面来考虑生态恢复的，存在一定的缺陷，恢复效益排名比较靠后；多种措施相结合，不仅能改善土壤环境，也会引起植物群落多样性格局的变化，生态恢复效益很好；同一种恢复措施，施行年限越长恢复效果越好。

**关 键 词：** 废弃金矿，人工回复，效益，主成分分析法，阿尔泰山
**文章编号：** 1000－6060(2019)02－0288－07(0288～0294)

生态退化作为全世界面临的严重问题之一，对人类生存和可持续发展产生严重威胁。面临这种严重的生态问题，人们逐步意识到生态恢复工作的重要性，自从上世纪70年代以来，世界各国广泛开展了有关生态恢复的理论与实践研究[1]。采金矿区造成的生态环境问题已引起了人们对矿区生态恢复的高度重视，对废弃矿区的治理及复垦成为生态恢复学研究的重要课题。据调查，至2010年，我国因采矿直接破坏土地约为412.3×$10^4$ $hm^2$，已破坏的草地面积达26.3×$10^4$ $hm^2$，并且每年平均破坏面积到达4 167×$10^4$ $hm^2$[2]，仅在新疆地区初步查明的大中型金矿废弃矿区就有270多处[3]；破坏面积大，需要科学治理的需求急迫。

生态恢复作为一项长期的动态过程，对已经完成的或者正在进行的生态恢复工程的效果进行精准、科学和客观地评价，及时了解生态系统当前的状况、恢复程度、发展趋势等方面的信息，它不仅是生态恢复工程的主要内容之一，而且还能为生态恢复提供宝贵信息，进一步调整和改善恢复方案的重要措施。随着生态恢复评价工作的迅速发展，评价方法的种类也越来越多了，目前生态恢复评价的主要方法有统计学方法[4－6]、综合评价法[7]、模糊评价法和主成分分析法[8－10]。

主成分分析法(Principal Component Analysis，简称PCA)，是在尽可能保证原信息的前提下，通过线性变换对各类指标进行“聚集”，并摈弃很少部分信息，从而简化高维的指标数据。使用主成分分析法，能把众多的生态恢复环境效应方面的的评价指标重新整合，去除指标中的重复信息，既能减少生态恢复评价的工作量，又能增加评价小率；而且还能更全面地评价生态恢复工作的环境效应[11]。

目前国内已有学者对废弃矿区的恢复技术做过相关研究[4－6]，但多集中在我国中东部地区，对西部干旱、半干旱地区废弃矿区生态重建的研究和实验示范少有报道。同时，针对阿尔泰山两河源保护区，由于采金活动引起的生态环境问题的研究几乎是一片空白[12－13]。阿尔泰山两河源保护区是阿勒泰地区乃至整个北疆地区重要的生态屏障[13]，其生态环境问题关系着新疆的稳定与发展。

① **收稿日期：** 2018－11－15； **修订日期：** 2019－02－01
**基金项目：** 西部之光项目(Y734341)和国家科技基础性工作专项课题(2015FY110508－16)资助
**作者简介：** 艾沙江·艾力(1971－)，男，博士，维吾尔族，研究方向环境工程
**通讯作者：** 徐海量(1971－)，男，博士，研究方向恢复生态学

## 1 材料与研究方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域,即阿尔泰山两河源自然保护区包括了阿勒泰地区福海县、富蕴县和青河县山地森林带和中、高山地带,位于阿尔泰山南坡、准格尔盆地北缘,地理位置87°30′~90°00′N,46°30′~48°10′E,总面积为 $11.3\times10^4$ $km^2$。该区域气候比较复杂,属于温带大陆性寒冷气候,多年平均气温 -2 ℃,年降水量为 560 mm,额尔齐斯河和乌伦古河发源于该地区,由于山地积雪比较丰富,该区域变成阿勒泰乃至全疆的最重要水源基地。研究区域天然植被资源比较丰富,原始植被超过 1 400 种,主要植被类型有草原、草甸、沼生植物和高山植被。研究区域内有喀纳斯自然保护区等著名景区,还有可可托海矿区等全国有名的矿区,该区域目前已经查明的矿产资源类型有 84 种,分别占全国和全疆矿产资源种数的 43.2% 和 65% 。但是由于上个世纪 90 年代开始,人类在该地区开展以单纯经济利益为目的的采矿活动,导致水源污染、水土流失、自然景观受损等严重的生态问题[9],其中仅在两河源库尔木图段,废弃矿区总面积就达到 333.33 $hm^2$。

### 1.2 数据来源

针对废弃矿区生态破坏的特点,考虑地形、土壤、水分、地表植被等环境因子,于 2010 年开始,在两河源采金废弃地,进行了植被恢复实验。2010 年布置 4 个恢复措施样地,2011 年布置 7 个恢复措施样地。每个样地间隔大于 1 km,并布置围栏,为了避免人为活动和动物对实验的干扰,从每块样地中选取三、四个小样方,进行了恢复性实验并记录监测数据。采金活动破坏了当地原有的地形,直接摧毁了草原表层土壤和植被,引起区域内生态环境的退化。为了修复地形起伏大,砾石堆积,土壤有机质流失,植被丧失三方面导致的生态环境破坏,本研究设置单一措施(只针对某一方面进行恢复的措施,例如:推平,人工补种等)以及叠加措施(针对破坏的多个方面进行恢复的措施,例如:推平 + 覆土,覆土 + 喷泥浆等),进行恢复效果的比较。以下各恢复措施均在地表平整的基础上实施。

(1) 推平:用推土机将大块砾石搬到拟推平区域,将细小碎石推平压实,地表以下 50 cm 形成致密的尾矿区,地表落差一般不超过 20 cm。

(2) 推平 + 黑加仑(*Saxifragaceae*):在土地平整的基础上种植黑加仑(*Saxifragaceae*),在栽植穴底部覆盖营养土,以能够将苗木的根完全覆盖为标准。黑加仑选择植株健壮、根系发达、高度 50 cm 以上的幼苗,采用 2~3 年扦插苗穴栽,株行距为 1 m ×2 m。

(3) 推平 + 覆土 + 黑加仑:在土地平整的基础上,在实验区周边取当地土,土壤为山地黑钙土,人工使用铁锹均匀覆盖在推平后的地表,覆土厚度设置为 4 cm,种植黑加仑,株行距为 1 m×2 m。

(4) 推平 + 覆土 + 黑加仑 + 撒种子:在土地平整的基础上,覆盖当地土,土层厚度 4 cm,种植黑加

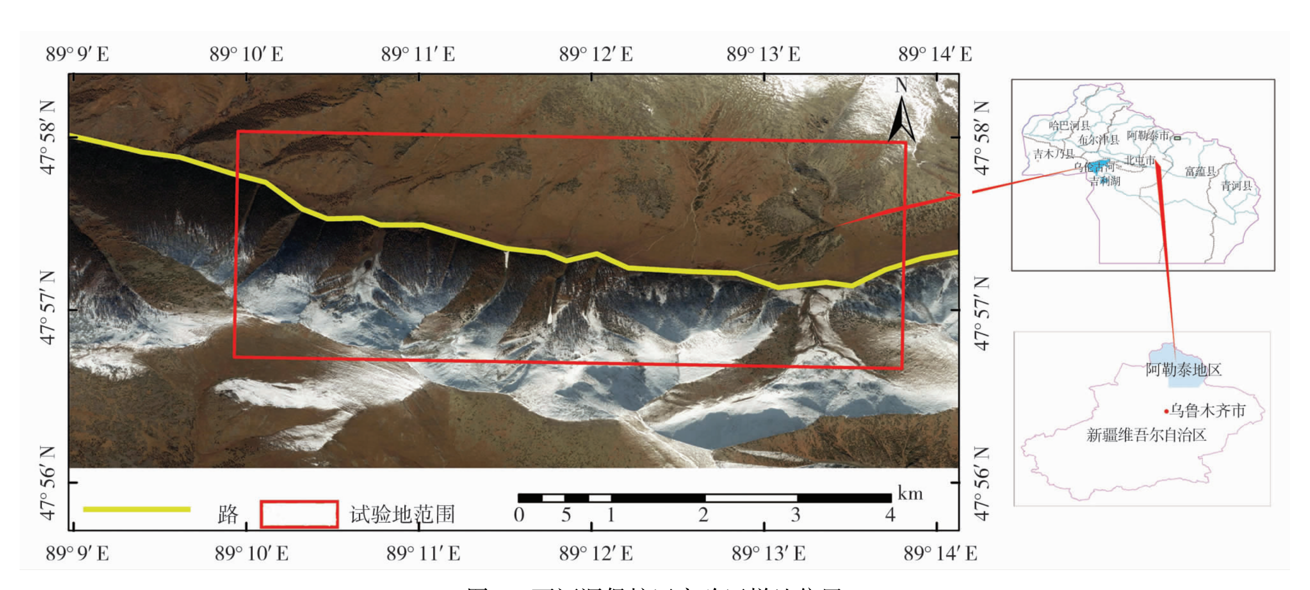



图 1 两河源保护区实验区样地位置

Fig. 1 Location of sample plots of Two-river Nature Reserve

仑,株行距为 1 m×2 m,由于瑞士羊茅(*Festuca valesiaca*)、异燕麦(*Helictorichon*)、发草(*Deschampsia caespitosa*)三种植被在研究区域原始草地中优势比较明显,因此,这三种草籽被选择,并把它们混合均匀后撒播在平整后的地表,撒播时间为 2011 年 6 月份。

(5)羊群驻扎:在推平的试验地引羊群驻扎,借助羊粪和粪便中的草种进行恢复,在面积约 0.16 $km^2$ 的实验区,驻扎约 300 只羊,驻扎时间持续 20 d,于第二年观测恢复效果。

(6)引河水漫溢:每年的 7、8 月份,将河水引导靠近河边的低洼实验地进行灌溉,每年漫灌 2 到 3 次。

(7)喷泥浆:在地表平整的基础上,从实验区周边取土,将水和土按体积比 8:2 混合后,利用水泵抽出后均匀喷洒在实验区。补给水量 1 $km^2$ 约为 150～200 $m^3$。

(8)撒羊粪:鉴于羊粪在家畜粪肥中养分最浓,是优质的有机肥,其中氮、磷、钾含量最高,被称为“肥中之肥”。本研究直接将羊粪按 1.5 cm 厚度覆盖在推平后的试验地,一年后观测恢复效果。

(9)喷泥浆+撒羊粪:在平整的实验区,均匀喷泥浆后,覆盖 1.5cm 羊粪。

## 2 研究方法

### 2.1 恢复指标计算

研究区的海拔范围在 1500～2100 m 的真草原山区,于 2015 年 6～8 月(地表植被最茂盛季节)进行植被调查。在每个恢复措施样地内随机取 5 个 1 m×1 m 样方,记录每样方内物种总类($N$)、每种植物个数($n$)、高度($h$)和盖度、地上部分生物量鲜重、土石比。

(1)丰富度指数(Richness index)[14]:

$$R = \frac{(S-1)}{\ln N} \tag{1}$$

(2)优势度指数 Simpson 指数($D$)[15]:

$$D = 1 - \sum P_i^2 \tag{2}$$

(3)多样性指数(Shannon-Wiener 指数)($H'$)[16]:

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \tag{3}$$

(4)均匀度指数(Pielou 指数)($Jsw$)[17]:

$$Jsw = \frac{H'}{\ln S} \tag{4}$$

式中:$S$ 为样方中出现的物种数量;$P_i = N_i/N$($N$ 为群落中所有种的重要值之和;$N_i$ 是第 $i$ 个种的重要值)。

(5)生物量:在每种恢复措施样地内随机取 5 个 1 m× 1 m 样方,首先将草本的地上部分剪下来,然后用 0.5 g 精度的电子天平把剪下来的草本称重,把重量作为草本的生物量。

(6)植被盖度:在 1 m× 1 m 样方内,采用目测估算法,凭借经验直接判断样方内植被覆盖度,分别记录样方内总盖度和每种植物的分盖度。

(7)物种数:在 1 m× 1 m 样方内识别出现的物种总数。

(8)土石比:在上述 1 m×1 m 样方中获取地上生物量 $M_{鲜}$ 后,在样方内选取一个土石比样方(大小 40 cm× 40 cm,深度 20 cm)。将样方内土壤和石块全部挖出,用圆木棍将土样碾碎,仔细挑去植物根茎和其他杂物,使土样过筛,能过 5 mm 筛的土样记作为土壤 $M_{土}$,没能过 5 mm 筛的土样记作为石头 $M_{石}$,把两种土样分别在 1/1 000 的电子天平上称重,分别记录 $M_{土}$ 和 $M_{石}$ 值,计算出土石比 $W_{土石比}$(%),即:

$$土石比均值 = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_{土i}}{\sum_{i=1}^{n} M_{石i}} \tag{5}$$

### 2.2 主成分分析法

主成分分析,又称主组元分析或主分量分析,它是利用变量组的几个线性组合来辩解多维变量的协方差结构,选出最佳变量子集,简化数据,揭示变量之间相互关系的一种多元统计分析方法[3,4,18]。主成分分析法的计算步渠如下[19-20]:

(1)建立原始变量矩阵 $X_{ij}$。矩阵包括 $n$ 个样本,$p$ 为每个样本包括的指标变量,$n$ 和 $p$ 构成原始数据的矩阵($X_{ij}$)$n \times p$,其中 $i = 1,2,\cdots,n$;$j = 1,2,\cdots,p$;$X_{ij}$表示第 $i$ 个样本的第 $j$ 个指标。

(2)原始数据的标准化。数据处理前,由于指标数量级相差太大,因此,将原始数据转化成标准化数据,即无量纲的数据,这样相差比较大的数据具备较好的可比性。用 Z-Score 标准化把原始变量矩阵

$X_{ij}$变换,并得到新的矩阵 $Z_{ij}$[6],即:

$$Z_{ij}=\frac{(X_{ij}-\bar{X}_j)}{S_j} \quad (6)$$

式中:$X_j$ 为原始变量的平均值;$S_j$ 为原始变量的标准差。

$$\bar{X}_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_{ij} \quad (7)$$

$$S_j^2=\frac{1}{n=1}\sum_{i=1}^{n}(X_{ij}-\bar{X}_j)^2 \quad (8)$$

(3) 计算相关系数矩阵 $R$。

$$R=(r_k)_{p\times p},\ r_k=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}Z_{ij}Z_{ik}$$

$$(k=1,2,\cdots\cdots\cdots p) \quad (9)$$

(4) 计算特征值、确定主成分。首先获取特征值 $\lambda_i$,并其按大小顺序排列,即 $\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\lambda_p\geqslant0$。

根据特征值 $\lambda_i$ 求出对应的特征向量 $l_i(i=1,2,\cdots,p)$,可以获取相应的主成分。每一个主成分($PC$)是由标准化后的指标向量转换成的,即:

$$F_j=I_1Z_1+I_2Z_2+\cdots+I_pZ_p \quad (10)$$

式中:$Z_j$ 为矩阵 $Z_{ij}$的特征向量;$F_j$ 为第 $j$ 主成分,每个主成分 $F_j$ 对应的特征值 $\lambda_j$ 就等于它的方差,又是对主成分 $F_j$ 的贡献。$F_j$ 的贡献率为,贡献率的大小表示它包含的原信息数量的多少。

(5) 确定主成分的数量。累计方差贡献率,是指前 k 个主成分方差占总方差的比例,即:

$$\alpha=\sum_{i=1}^{p}\lambda_j\Big/\sum_{i=1}^{n}\lambda_j(0<\alpha\leqslant1) \quad (11)$$

式中,$\alpha$ 为累计方差贡献率。如果前 $k$ 个主成分的累计方差贡献率超过 80%,就算包含绝大部分的原信息。

(6) 计算主成分最终评价值。

$$F=(\lambda_1/\lambda_1+\lambda_2+\cdots\lambda_p)F_1+(\lambda_2/\lambda_1+\lambda_2+\cdots\lambda_p)F_2+\cdots+(\lambda_p/\lambda_1+\lambda_2+\cdots\lambda_p)F_a \quad (12)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 建立评价指标体系及相关性分析

结合阿尔泰山采金废弃矿区人工恢复措施效益,根据客观性、易获取性、可比性、完整性等原则[3],建立指标体系。这些指标包括:丰富度指数($y_1$),优势度指数($y_2$),多样性指数($y_3$),均匀度指数($y_4$),均匀度指数($y_5$),植被盖度($y_6$),物种数($y_7$),土石比($y_8$)。使用公式 1-5 计算出各种恢复措施的恢复效率指标(表 1)。

使用统计软件 SPSS21.0,根据各种恢复措施指数,可以算出各指标之间的相关系数矩阵(请见表 2)。

从表 1 中显示的数据可以看出,8 项指标之间的绝大部分相关系数都大于0.7,说明它们之间存

**表 1 各种措施的恢复效率指标**

**Tab. 1 Restoration index of different measures**

| 恢复措施 | 恢复效率指标 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 丰富度指数 $y_1$ | 优势度指数 $y_2$ | 多样性指数 $y_3$ | 均匀度指数 $y_4$ | 生物量 $y_5$ | 植被盖度 $y_6$ | 物种数 $y_7$ | 土石比 $y_8$ |
| 推平(5 a) | 0.098 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 10.000 0 | 0.600 0 | 1.333 3 | 0.120 6 |
| 推平(6 a) | 0.361 6 | 0.166 7 | 0.231 0 | 0.333 3 | 11.600 0 | 0.600 0 | 2.333 3 | 0.110 0 |
| 推平+黑加仑(6 a) | 0.833 9 | 0.360 6 | 0.694 7 | 0.405 7 | 93.300 0 | 4.533 3 | 5.666 7 | 0.157 9 |
| 推平+黑加仑(5 a) | 0.882 3 | 0.328 9 | 0.533 0 | 0.574 0 | 80.000 0 | 0.400 0 | 4.000 0 | 0.133 5 |
| 推平+覆土+黑加仑+撒种子(5 a) | 1.327 5 | 0.375 2 | 0.876 9 | 0.375 5 | 589.500 0 | 54.444 4 | 10.222 2 | 1.554 1 |
| 推平+覆土+黑加仑(6 a) | 1.708 9 | 0.610 1 | 1.257 7 | 0.548 4 | 336.691 0 | 52.000 0 | 10.900 0 | 0.655 6 |
| 羊群驻扎(5 a) | 0.980 2 | 0.580 8 | 1.192 7 | 0.688 1 | 83.067 0 | 6.666 7 | 6.000 0 | 0.426 3 |
| 引河水漫溢(5 a) | 0.904 9 | 0.620 3 | 1.240 6 | 0.724 0 | 153.458 5 | 26.433 3 | 6.000 0 | 1.525 2 |
| 喷泥浆(6 a) | 1.201 1 | 0.486 2 | 0.949 1 | 0.558 3 | 0.150 0 | 7.050 0 | 6.000 0 | 0.380 0 |
| 喷泥浆+撒羊粪(5 a) | 0.928 8 | 0.340 1 | 0.664 0 | 0.429 3 | 0.210 0 | 16.287 5 | 6.000 0 | 0.500 0 |
| 撒羊粪(5 a) | 0.671 1 | 0.259 7 | 0.490 2 | 0.362 3 | 0.190 0 | 8.666 7 | 4.000 0 | 0.460 0 |

表 2 相关系数矩阵

Tab. 2 Correlation coefficient matrix

| 指标 | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $y_6$ | $y_7$ | $y_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_1$ | 1.000 | 0.806 | 0.832 | 0.621 | 0.632 | 0.751 | 0.943 | 0.476 |
| $y_2$ | 0.806 | 1.000 | 0.988 | 0.909 | 0.345 | 0.491 | 0.716 | 0.506 |
| $y_3$ | 0.832 | 0.988 | 1.000 | 0.848 | 0.443 | 0.582 | 0.782 | 0.584 |
| $y_4$ | 0.621 | 0.909 | 0.848 | 1.000 | 0.122 | 0.208 | 0.458 | 0.358 |
| $y_5$ | 0.632 | 0.345 | 0.443 | 0.122 | 1.000 | 0.895 | 0.805 | 0.718 |
| $y_6$ | 0.751 | 0.491 | 0.582 | 0.208 | 0.895 | 1.000 | 0.898 | 0.773 |
| $y_7$ | 0.943 | 0.716 | 0.782 | 0.458 | 0.805 | 0.898 | 1.000 | 0.628 |
| $y_8$ | 0.476 | 0.506 | 0.584 | 0.358 | 0.718 | 0.773 | 0.628 | 1.000 |

在着比较显著的相关关系。

### 3.2 评价过程

在各种措施恢复效率指标的基础上，使用公式10和11，得出8项指标的特征值、方差贡献率、累计贡献率、因子载荷以及特征向量（见表3和表4）。

根据提取主成分的原则，提取了两个主成分，第一个主成分的贡献率为46.728%，特征值是3.738；第二个主成分的贡献率为43.347%，特征值是3.468，累计贡献率为90.075%（>85%），由此可见，可靠性已满足要求，具有极高的代表性。

根据公式：特征向量=因子载荷值/SQR（特征值），求出2个主成分的特征向量，即主成分得分表达式中各指标对应的系数。主成分得分公式：

表 3 主成分总方差

Tab. 3 Principal component matrix

| 初始特征值 | | | 提取平方载荷总和 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 特征值 | 方差贡献率/% | 累计贡献率/% | 特征值 | 方差贡献率/% | 累计贡献率/% |
| 5.594 | 69.920 | 69.920 | 3.738 | 46.728 | 46.728 |
| 1.612 | 20.155 | 90.075 | 3.468 | 43.347 | 90.075 |

表 4 因子荷载及特征向量矩阵

Tab. 4 Factor loading and eigenvector matrix

| 指标 | 因子载荷 1 | 因子载荷 2 | 特征向量 1 | 特征向量 2 |
|---|---|---|---|---|
| $y_1$ | 0.164 | 0.043 | 0.044 | 0.012 |
| $y_2$ | 0.155 | 0.302 | 0.041 | 0.087 |
| $y_3$ | 0.163 | 0.232 | 0.044 | 0.067 |
| $y_4$ | 0.121 | 0.428 | 0.032 | 0.123 |
| $y_5$ | 0.133 | −0.375 | 0.036 | −0.108 |
| $y_6$ | 0.151 | −0.311 | 0.040 | −0.090 |
| $y_7$ | 0.169 | −0.118 | 0.045 | −0.034 |
| $y_8$ | 0.133 | −0.199 | 0.036 | −0.057 |

$$Z_1 = 0.044^* y_1 + 0.041^* y_2 + 0.044^* y_3 + 0.032^* y_4 + 0.036^* y_5 + 0.040^* y_6 + 0.045^* y_7 + 0.036^* y_8$$

$$Z_2 = 0.012^* y_1 + 0.087^* y_2 + 0.067^* y_3 + 0.123^* y_4 - 0.108^* y_5 - 0.090^* y_6 - 0.034^*_y 7 - 0.057^* y_8$$

根据两个主成分得分，使用公式：$F=(3.738/7.206)^* Z_1 + (3.468/7.206) Z_2$，可以计算每一种恢复措施的综合得分及排名。

表 5 各种恢复措施的综合得分及排名

Tab. 5 Final score and ranking of various recovery measures

| 恢复措施 | $Z_1$ | $Z_2$ | $F$ | 总排名 |
|---|---|---|---|---|
| 推平(5 a) | −0.488 4 | −0.694 2 | −0.604 8 | 11 |
| 推平(6 a) | −0.329 2 | −0.370 1 | −0.358 1 | 10 |
| 推平+黑加仑(6 a) | −0.081 2 | −0.124 4 | −0.105 1 | 7 |
| 推平+黑加仑(5 a) | −0.119 4 | −0.107 7 | −0.116 4 | 8 |
| 推平+覆土+黑加仑+撒种子(5 a) | 0.380 0 | 0.069 4 | 0.232 3 | 3 |
| 推平+覆土+黑加仑(6 a) | 0.436 0 | 0.400 2 | 0.428 8 | 1 |
| 羊群驻扎(5 a) | 0.109 6 | 0.278 7 | 0.197 9 | 4 |
| 引河水漫溢(5 a) | 0.254 1 | 0.497 9 | 0.383 9 | 2 |
| 喷泥浆(6 a) | 0.048 4 | 0.172 5 | 0.112 4 | 5 |
| 喷泥浆+撒羊粪(5 a) | −0.038 4 | 0.031 3 | −0.004 1 | 6 |
| 撒羊粪(5 a) | −0.169 9 | −0.149 1 | −0.163 6 | 9 |

评价结果产生负值是由于数据标准化的结果，不能把这种情况解释为这些恢复措施的效益最差。因为在数据标准化处理中，以0作为各个评价指标的平均水平。根据综合得分F的大小，可以确定不同恢复措施的生态效益排名。

### 3.3 各种恢复措施的生态效益差异分析

从表5可以看出，不同恢复措施的综合得分（$F$值）有很大的差异。总的来看，单一的恢复措施，如推平、喷泥浆、撒羊粪等措施只能对研究区土壤母质

或土壤水分进行补充。因为单一措施基本上是从某一个方面来考虑,存在一定的缺陷,矿区生态环境问题是各种因素相互作用的结果。因此,本研究单一恢复措施的恢复效益排名比较靠后(分别排在第5、9、10和11位)。而且,多种措施相结合,可以达到从水、土、气、生物、地形等多方面的生态恢复。在矿区,土壤不仅是植物生长和发育的物质基础,而且是植物所需要的各种养分的来源。在一般的自然环境状态下,植被的生长发育取决于土壤的养分,然而植物也通过自己的新陈代谢作用改善土壤的理化性质。多种措施相结合不仅能改善土壤环境,而且也会在植物群落多样性格局产生很大的变化。比如,推平+覆土+黑加仑+撒种子的恢复效率很好,总得分排名为第一和第三位。引河水漫溢的恢复效益也非常好,总得分排名为第二位,因为充足的水分会促进养分效应的发挥。从不同恢复措施的主成分排名又可以看出,同一种恢复措施,施行年限越长恢复效果越好。比如,单一推平措施的恢复效益跟着施行年限的不同而改变,推平(6 a)的恢复效益排在第十位,推平(5 a)的恢复效益排在第十一位。叠加措施的恢复效益也随着恢复年限而增加,如措施推平+黑加仑(6 a)的恢复效益排在第7位,而推平+黑加仑(5 a)的恢复效益排在第8位。

## 4 结 论

(1) 利用主成分分析法,通过把原数据相关变换之后可以用少量的综合变量来代替原有较大的变量,能够把数据结构简化,并能有效地评价各种恢复措施的内在差异性,选出符合研究区域的有效恢复措施。

(2) 主成分分析法评价结果表明,只采取单一恢复措施虽然可以把废弃矿区的生态效益改善,但恢复周期比较长,然而采取叠加措施可以更有效地恢复废弃矿区的生态效益。废弃矿区的生态环境问题是由自然和人为因素相互作用引起的。因此,采取单一的治理措施很难实现该区域生态全面恢复的目标。

(3) 从不同恢复措施的主成分排名可以看出,同一种恢复措施,施行年限越长恢复效果越好。

## 参考文献(References)


[1] 李洪远,鞠美庭. 生态恢复的原理与实践[M]. 北京:化学工业出版社,2004. [LI Hongyuan,JU Meiting. Principles and practice of ecological restoration[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004.]

[2] 孙书存,包维楷. 恢复生态学[M]. 北京:化学工业出版社,2004. [SUN Shucun,BAO Weikai. Restoration ecology[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004.]

[3] 赵晓英,陈怀顺,孙成权. 恢复生态学:生态恢复的原理与方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2001. [ZHAO Shaoying,CHEN Huaishun,SUN Chengquan. Restoration ecology:Principle and methods of ecological restoration[M]. Beijing:China Environmental Science Press,2001.]

[4] 米文宝,谢应忠. 生态恢复与重建研究综述[J]. 水土保持研究,2006,13(2):49－53. [MI Wenbao,XIE Yingzhong. Review of ecological restoration and reconstruction[J]. Research of Soil and Water Conservation,2006,13(2):49－53.]

[5] 包维楷,刘照光,刘庆. 生态恢复重建研究与发展现状及存在的主要问题[J]. 世界科技研究与发展,2001,23(1):44－48. [BAO Weikai,LIU Zhaoguang,LIU Qing. Research,development status and main problems of ecological restoration and reconstruction[J]. World Sci-Tech R & D,2001,23(1):44－48.]

[6] 范国忠,杨作廉. 现代统计分析方法[M]. 北京:中国统计出版社,1992. [FAN Guozhong,YANG Zuomi. Modern statistical analysis methods[M]. Beijing:China Statistics Press,1992.]

[7] 裴鑫德. 多元统计分析及其应用[M]. 北京:北京农业大学出版社,1991. [PEI Xinde. Multivariate statistical analysis and its application[M]. Beijing:Beijing Agricultural University Press,1991.]

[8] 卜兆宏. 主成分分析的简便解算法及其应用[J]. 土壤通报,1982,(4):45－49. [BU Zhaohong. Simple solution algorithm of principal component analysis and its application[J]. Chinese Journal of Soil Science,1982,(4):45－49.]

[9] OANH N T K,CHUTIMON P,EKBORDIN W,et al. Meteorological pattern classification and application for forecasting air pollution episode potential in a mountain-valley area[J]. Atmospheric Environment,2005,39(7):1211－1225.

[10] VOUKANTSIS D,KARATZAS K,KUKKONEN J,et al. Intercomparison of air quality data using principal component analysis,and forecasting of $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ concentrations using artificial neural networks in Thessaloniki and Helsinki[J]. Science of the Total Environment,2011,409(7):1266－1276.

[11] 万金保,曾海燕,朱邦辉. 主成分分析法在乐安河水质评价中的应用[J]. 中国给水排水,2009,25(16):104－108. [WAN Jinbao,ZENG Haiyan,ZHU Banghui. The application of principal component analysis in the evaluation of water quality of Le,an River[J]. China Water & Wastewater,2009,25(16):104－108.]

[12] 新疆福海县史志编纂委员会. 福海县志[R]. 2000:649－655. [History Compilation Committee of Fuhai County. Annals of Fuhai County[R]. 2000:649－655.]

[13] 青河县地方志编纂委员会:青河县志[R]. 2001:332－335. [Local Chronicle Editorial Committee of Qinghe County. Annals of Qinhe County[M]. 2001:332－335.]

[14] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I. α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性,1994,2(3):162－168. [MA Keping. A method for measuring diversity of biological communities:Measures of diversity (I)[J]. Chinese Biodiversity,1994,2(3):162－

168.]

[15] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I. α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性,1994,2(4):231－239. [MA Keping. A method for measuring diversity of biological communities: Measures of diversity (II)[J]. Chinese Biodiversity,1994,2(4):231－239.]

[16] 刘德林,刘贤赵. 主成分分析在河流水质综合评价中的应用. 水土保持研究,2006,13(3),124－125. [LIU Delin, LIU Xianzhao. Application of principal component analysis in comprehensive evaluation of river water quality[J]. Research of Soil and Water Conservation,2006,13(3),124－125.]

[17] AILI A, OANH N T K. Effects of dust storm on public health in desert fringe area: Case study of northeast edge of Taklimakan Desert, China[J]. Atmospheric Pollution Research,2015,6(5):805－814.

[18] 新疆阿勒泰山林业局. 新疆阿勒泰山两河源综合科学考察[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技出版社,2004. [Altai Forestry Bureau of Xinjiang. Comprehensive scientific expedition of Two-River Source Region of Altay Mountain, Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press,2004.]

[19] 富蕴县地方志编纂委员会. 富蕴县志[R]. 2001:182－184. [History Compilation Committee of Fuyun County. Annals of Fuyun County[R]. 2001:182－184.]

[20] GEKADU P, ISAKSSON H, LINDQVIST L, et al. Principal component analysis of multivariate images[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,1989,5(3):209－220.

# Assessment of the effects of artificial restoration measures in abandoned gold mining area in Altay Mountains using PCA and monitoring data

Aishajiang AILI, XU Hai-liang, YUAN Kai-ye

(*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*)

**Abstract:** Ecological restoration has been widely regarded as an effective approach for mitigating ecological degradation and improving ecosystem service supply. Environmental effects evaluation on ecological restoration i. e. measuring the ecological restoration extent of damaged ecosystem is one of the important branches of restoration ecology. Scientific, objective and accurate assessment of ecological restoration effects not only was important element of ecological restoration, but also could provide important guidance to the further implementation of ecological restoration. The "Two River Nature Reserve" in the Altay Mountains is located at the southern slope of the Altay Mountains, Xinjiang, China. This ecoregion is characterized by mountains dissected by river valleys, high levels of precipitation, and high biodiversity. The climate condition of this region is characterized by long cold winters, and short, cool summers. Irrational gold mining activities in this area have caused serious ecosystem degradation and led to the overall degradation or even the loss of ecological functions. In this paper, an abandoned gold mining field in Altay Mountains, Xinjiang was selected as study area. 11 kinds of restoration measures taken by "Two river Nature Reserve Administration" from 2010 to 2015 were examined by calculating the richness index, dominance index, diversity index, evenness index, biomass, vegetation coverage, species number and soil-rock ratio index. Further, the Principal Component Analysis (PCA) was used to compare the efficiency of each artificial measure. The results show that the effects of the single restoration measures, such as leveling, flock, mud and so on was not ideal; The combination of various measures can only improve the soil environment, but also lead to the change of plant community diversity, and the ecological restoration benefits are very good; As far as the same kind of restoration measure is considered, the longer restoration period the better recovery effect. According to a systematic summary of the study progress on effects evaluation of ecological restoration in an abandoned gold mining field in Altay Mountains, this paper supplies a brief account of effects evaluation from the aspects of its content, approach, method and technology.

**Key words:** abandoned gold mine; artificial restoration; effects; Principal Component Analysis; Altay Mountains